

оценки значений функции яркости на участках постоянства предлагается использовать итерационную процедуру Ван-Циттерта, в которой текущее приближение изображения вычисляется на каждом шагу при помощи формулы:

$$x^N = y + J - A x^{N-1} = y + x^{N-1} - A x^{N-1},$$

где J - единичный оператор, а A - оператор искажений, преобразующий исходное изображение среднего разрешения к изображению низкого разрешения.

В традиционной процедуре Ван-Циттерта не учитывается этап с дискретизацией, интерполяцией и усреднением внутри границ, поэтому восстановление велось бы с той точки зрения, что оператор искажений A – это импульсная характеристика сглаживающей системы. В нашем случае под оператором искажений A будем понимать последовательность действий операторов сглаживания, дискретизации, интерполяции и усреднения. В качестве начального приближения используется изображение результат интерполяции и усреднения с учетом границ областей. Тогда итерационная схема восстановления обеспечит значительно более эффективный результат, чем традиционное задание оператора искажений. Усреднение по областям с известными границами, позволяет сделать результат наиболее точным. Так как выполнение усреднения нейтрализует граничные эффекты, возникающие при многократном применении прямого искажающего оператора, состоящего из сглаживания дискретизации и интерполяции. Критерием останова итерационного процесса является близость решений на соседних итерациях.

В ходе исследования работы метода на тестовых мозаичных полях было выяснено, что

- Метод позволяет восстановить относительно мелкие объекты на кусочно-постоянном изображении (размер объекта не менее 0.1 площади интервала дискретизации в условиях отсутствия шумов и точного знания искажающих факторов),

- Итерационная процедура сходится медленно при небольших шумах, поэтому необходимо усечение ее по порогу,

- Зависимость критерия останова итерационного процесса имеет экспоненциальный характер от номера итерации при условии отсутствия шумов, при наличии шумов график критерия останова имеет выраженный минимум, который при отношении шум/сигнал 0.01 практически совпадает с минимумом погрешности восстановления достигаемой процедурой.

- Качество восстановления изображения сильно зависит от корреляционных свойств изображения, чем корреляция отсчетов изображения выше, тем лучше результат восстановления. Например, при коэффициенте корреляции 0,9 и отсутствии шумов, восстанавливается 64% площади изображения с абсолютной погрешностью менее единицы.

УДК 004.056.53

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЙ МЕТОДОМ FDTD И С ПОМОЩЬЮ ФОРМУЛ РИЧАРДСА-ВОЛЬФА ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКИ СВЕТА ЗОННОЙ ПЛАСТИНКОЙ

Стафеев С.С.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет), г. Самара

В настоящее время преодоление дифракционного предела и уменьшение размеров фокального пятна актуально в литографии, оптических системах памяти и в медицинских приложениях. В работах посвященных моделированию острой фокусировки света в дальней зоне используются формулы Ричардса-Вольфа [1]. Так, например, в работе [2]

рассматривалась фокусировка радиально-поляризованных мод R-TEM₀₁ с помощью широкоапертурных линз, и было показано, что с их помощью можно преодолеть дифракционный предел. В работе [3] применена модификация формул Ричардса-Вольфа для радиально-поляризованного света, а в работе [4] была показана возможность преодоления дифракционного предела с помощью параболического зеркала и плоской дифракционной линзы. Однако ранее не проводилось исследования границ применимости формул Ричардса-Вольфа при малых фокусных расстояниях. В данной работе была промоделирована фокусировка радиально-поляризованной моды R-TEM₀₁ с длиной волны $\lambda=0,532$ мкм и радиусом моды 10λ (рисунок 1а) стеклянной зонной пластинкой с радиусом $R=20\lambda$ (рисунок 1б) с помощью двух различных методов: методом FDTD и по формулам Ричардса-Вольфа. Было показано, что наблюдается согласование значений диаметра фокального пятна при фокусном расстоянии зонной пластинки, изменяющемся от λ до 40λ (относительная погрешность значений диаметра фокусного пятна по полуспаду интенсивности не превышает 7%), однако при этом наблюдается рассогласование значений продольной ширины фокального пятна при фокусном расстоянии меньше 5λ . Оба метода показали возможность преодоления зонной пластинкой дифракционного предела при $f < 5\lambda$.

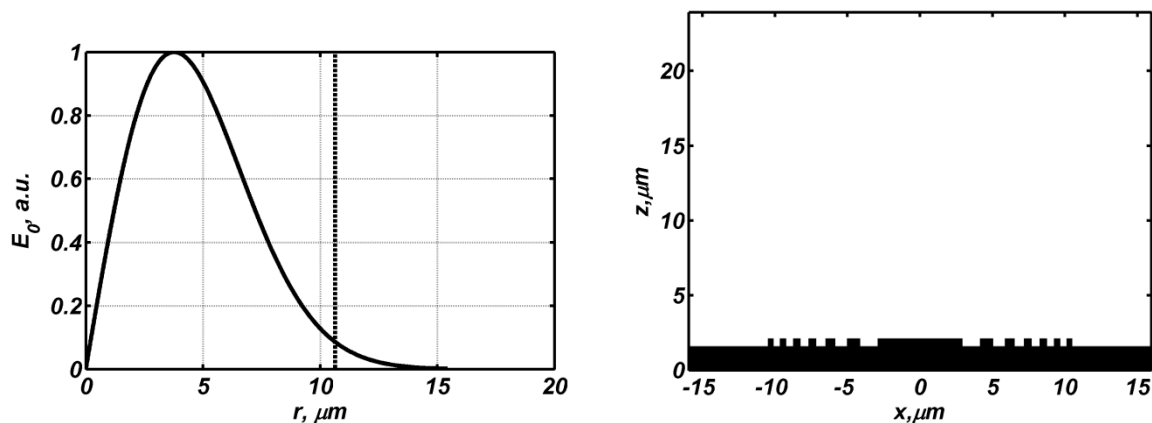


Рисунок 1. (а) радиальная составляющая амплитуды моды R-TEM₀₁. Пунктирной прямой отмечен радиус зонной пластинки, (б) зонная пластинка с фокусными расстояниями $f=30\lambda$ и ее расположение в вычисляемой области по методу FDTD

Ранее нами была предложена разновидность FDTD-метода, специально предназначенная для расчета дифракции радиально поляризованного лазерного пучка на оптических элементах с осевой симметрией [5]. При описании дифракции отличными от нуля в данном случае будут только три компоненты, описывающие электромагнитное поле: E_r , E_z и H_ϕ . Это радиальная и продольная составляющие электрического поля и азимутальная составляющая магнитного поля.

Используя методы FDTD и формулы Ричардса-Вольфа, было проведено две серии моделирований. Интенсивность вычислялась как сумма усредненных квадратов амплитуд электрической составляющей поля. На рисунке 2а показано изменение диаметра фокального пятна по полуспаду интенсивности для обоих моделирований. Как видно из рисунка 2а ширина пятен совпадает для обоих моделирований (при $\lambda \leq f \leq 40\lambda$ относительная погрешность значений диаметра фокусного пятна не превышает 7%). На рисунке 2б показано изменение продольной ширины фокального пятна по полуспаду интенсивности, из рисунка видно, что продольная ширина пятна хорошо согласуется для двух методов только при $f > 5\lambda$ (при $f = \lambda$ относительная погрешность достигает 40%, а при $f > 5\lambda$ не превышает 5%)

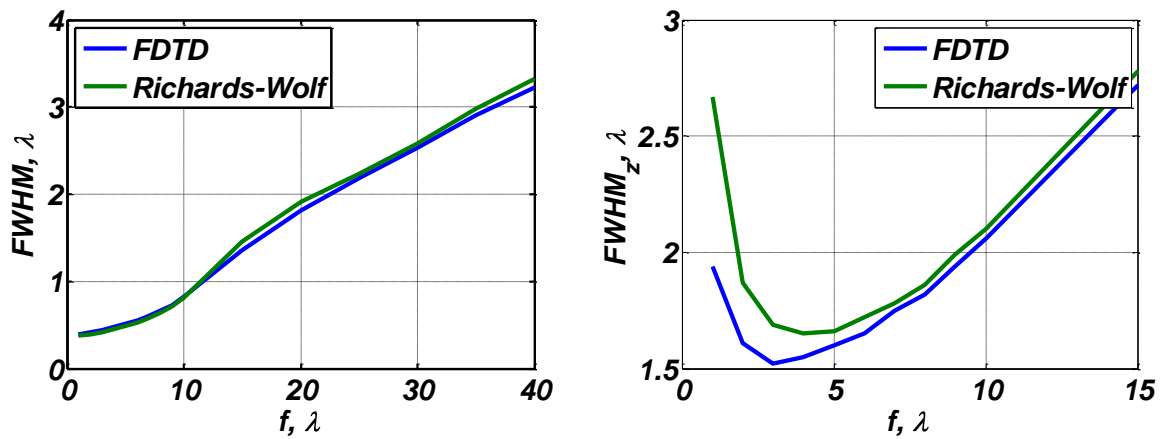


Рисунок 2. Зависимость (а) поперечной ширины фокального пятна (б) продольной ширины фокального пятна по полуспаду интенсивности от фокусного расстояния зонной пластинки при моделировании методом FDTD (синяя кривая) и по формулам Ричардса-Вольфа (зеленая кривая)

Таким образом, при фокусировке радиально-поляризованной моды R-TEM01 с длиной волны $\lambda=0,532$ мкм и радиусом моды 10λ стеклянной зонной пластинкой с радиусом $R=20\lambda$ методы FDTD и формулы Ричардса-Вольфа показывают согласование значений диаметра фокального пятна при $\lambda \leq f \leq 40\lambda$, однако при этом наблюдается рассогласование значений продольной ширины фокального пятна при $f < 5\lambda$. Кроме того, оба метода показали возможность преодоления зонной пластинкой дифракционного предела при $f < 5\lambda$

Список литературы

1. Richards, B. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic systems/ B. Richards, E. Wolf // Proc. Roy. Soc. A. – 1959. – V.253. – P.358-379.
2. Kozawa Y. Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams/ Y. Kozawa, S. Sato // J. Opt. Soc. Am. A. – 2007. – V.24. – P.1793-1798
3. Youngworth, K.S. Focusing of high numerical aperture cylindrical vector beams / K.S.Youngworth, T.G.Brown // Opt.Expr. – 2000. – V.7. – P.77-87
4. Davidson, N. High-numerical-aperture focusing of radially polarized doughnut beams with a parabolic mirror and a flat diffractive lens / N. Davidson, N. Bokor // Opt. Lett. – 2004. – V.29, No.12. – P.1318-1320.
5. Kotlyar, V. V. Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon / V. V. Kotlyar, S. S. Stafeev // J. Opt. Soc. Am. B. – 2010. – V.27. – P.1991-1997